Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol. **23,2**, 129-156 (2018)

SEISMIC ANALYSIS OF QUININDÉ HOSPITAL WITH TWO TYPES OF ISOLATORS

R. Aguiar

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
Av. General Rumiñahui s/n Valle de los Chillos, Ecuador. rraguiar@espe.edu.ec

Received: Octobert 2017. Accepted: March 2018

ABSTRACT

The seismic performance of the Hospital de Quinindé is analyzed, with two types of seismic isolators, one with a triple friction pendulum, which is acquired by EPS in the United States and another Orthotropic Frictional Pendulum (PFOT) manufactured by SPD of Chile. The analysis is done for spectra with return periods of 475, 975 and 2475 years, found for the Project site. Likewise, the non-linear response is found with 18 acceleration records that were scaled to the spectra found in the seismic hazard study. The two insulators are very efficient but a key variable for the decision is the cost, the manufactured in Chile costs practically half of the manufactured in the United States.

Key words: Triple pendulum isolator. Double curvature isolator.

ANÁLISIS SÍSMICOS DE HOSPITAL DE QUININDÉ CON DOS TIPOS DE AISLADORES

RESUMEN

Se analiza el desempeño sísmico del Hospital de Quinindé, con dos tipos de aisladores sísmicos, uno de triple péndulo de fricción, que se lo adquiere a EPS en Estados Unidos y otro Péndulo Friccional de Tipo Ortotrópico (PFOT) fabricado por SPD de Chile. El análisis se lo realiza para espectros con períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, hallados para el sitio del Proyecto. De igual manera se encuentra la respuesta no lineal con 18 registros de aceleración que fueron escalados a los espectros hallados en el estudio de peligrosidad sísmica. Los dos aisladores son muy eficientes pero una variable fundamental para la decisión es el costo, el fabricado en Chile cuesta prácticamente la mitad del fabricado en los Estados Unidos.

Palabras Claves: Aislador triple péndulo. Aislador de doble curvatura.

1 INTRODUCCIÓN

En el terremoto de Pedernales de Ecuador de 2016, de magnitud 7.8, quedó de manifiesto que las estructuras con aisladores sísmicos tuvieron un gran comportamiento a pesar de encontrarse prácticamente en la zona del epicentro. En efecto en Esmeraldas existen tres puentes con aisladores de triple péndulo de fricción, FPT, que no tuvieron ningún daño; vale la pena recordar cada uno de estos puentes que tienen estribos cerrados. De Sur a Norte, se tienen: i) El Puente Sur con una longitud de 160 m, tiene dos pilas intermedias en cada pila se colocaron tres aisladores FPT, que se aprecian en la figura 1 A; en los estribos se colocaron también 3 FPT en cada uno de ellos, de tal manera que el número total de aisladores en este puente es de 12; ii) El Puente Norte tiene una longitud de 120 m, y tiene una pila central similar a la indicada en la figura 1 A., luego en este puente se instalaron 9 FPT; iii) Finalmente el Puente Norte 1, de 160 m, de longitud y una pila central tiene 9 FPT. En total en los tres puentes se colocaron 30 FPT. Aguiar (2010)

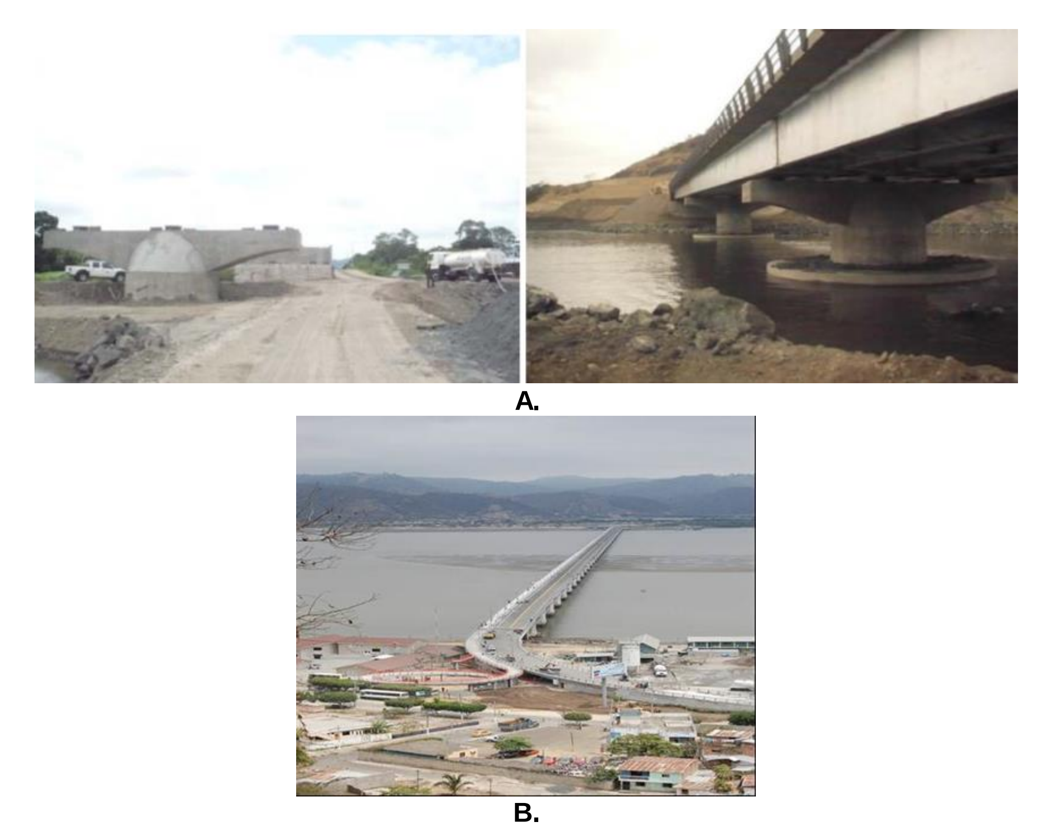


Figura 1 Puentes con aisladores de triple péndulo de fricción en Esmeraldas y Manabí.

El puente que une Bahía de Caráquez con San Vicente, es talvez uno de los más largos con aisladores sísmicos del mundo, los accesos no tienen aisladores y el puente de una longitud aproximada de 1.8 km, tiene 152 aisladores FPT. En la figura 1 B, se tiene una vista del puente que estuvo operativo después del terremoto del 16 de abril de 2016, de magnitud 7.8; las pilas son unas estructuras formadas por 4 columnas y sus respectivas vigas. Únicamente en la Pila 12, el deslizador del

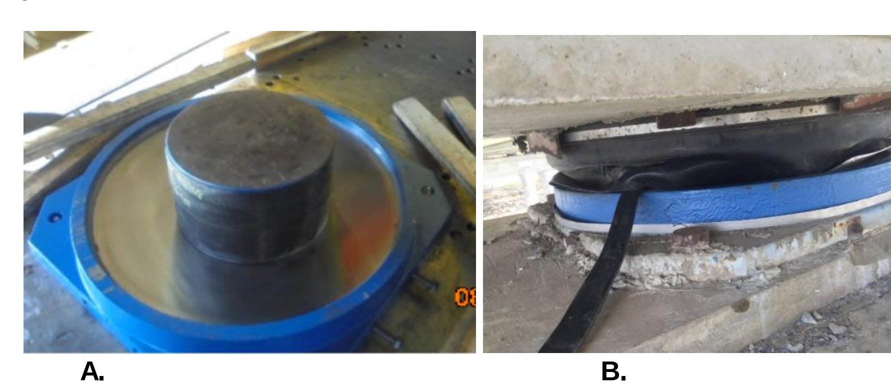
aislador golpeó al anillo de acero protector y se generó algunas fisuras, de tal manera que se puede indicar que los aisladores de esta pila que son 4, trabajaron en la fase 5 del modelo constitutivo propuesto por Fenz y Constantinou (2007, 2008). Estos aisladores van a ser cambiados.

En los tres puentes de Esmeraldas y en el puente de Manabí se colocaron el mismo aislador que se identifica FPT 8836/14-12/10-7 (Aguiar 2010).

Por otra parte en las construcciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se colocaron 81 aisladores FPT 8833/12-12/8-5. Aguiar (2017 a).

Posteriormente se verá que la capacidad de desplazamiento de los dos aisladores es muy parecida, pero se desplaza un poco más el aislador utilizado en la construcción de los Puentes de Manabí y Esmeraldas. Es importante destacar que el espesor del anillo perimetral es de 2.5’’ en los aisladores de los Puentes, en contraste con el 1.5’’ de los aisladores empleados en la ESPE.

En la figura 2 A, se presenta la placa inferior de radio R_1 de un aislador de triple péndulo; no está la placa superior de radio R_4, que completa el aislador; se observa también el deslizador central, que en realidad es otro aislador que tiene un radio inferior R_2 y una placa superior de radio R_3, en la parte interior se tiene otra base deslizante, de tal forma que se puede decir que el aislador FPT está compuesto por un aislador dentro de otro aislador. El objetivo de la figura 2 A, es que se vea el anillo que tiene por misión no permitir que el deslizador central se salga.



A. **B.**

Figura 2 A. Placa inferior de radio R_1 y deslizador central de FPT; B. Estado en que quedó un aislador de la Pila 12 del Puente de Bahía de Caráquez.

Las dos placas exteriores vienen protegidas por un caucho bastante grueso que tiene en su parte externa una cinta de acero.

Ahora bien, en la figura 2 B, se ve el estado en que quedó uno de los aisladores de la pila 12, se ve que se rompió el caucho protector; de igual forma se observa que el grout que está en la parte inferior se ha dañado; se ve la cinta protectora superior pero no aparece la cinta protectora inferior en su lugar, está más abajo, sobre el grout y aparece una pequeña fisura en el anillo protector. En base a esta experiencia del terremoto de Ecuador de 2016, es importante que el anillo protector sea de 2.5’’ como en el caso de los aisladores utilizados en los Puentes de Esmeraldas y Bahía de Caráquez.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS AISLADORES FPT

En el último párrafo del apartado anterior, se ha descrito el aislador de triple péndulo. Ahora en la figura 3, se indica la nomenclatura utilizada. Se señala con la palabra *deslizante rígida* el deslizador del aislador interior, que en la figura 2 A, está recubierta con caucho. A propósito existen dos protecciones de caucho, el interior que se acaba de indicar y el exterior que se observa en la figura 2 B.

En la figura 3, con la letra μ se identifica el coeficiente de roce que tienen, el subíndice corresponde a la placa en la que trabajan. De igual manera con la letra d se identifica la capacidad de desplazamiento del aislador, el subíndice hace referencia a la placa.

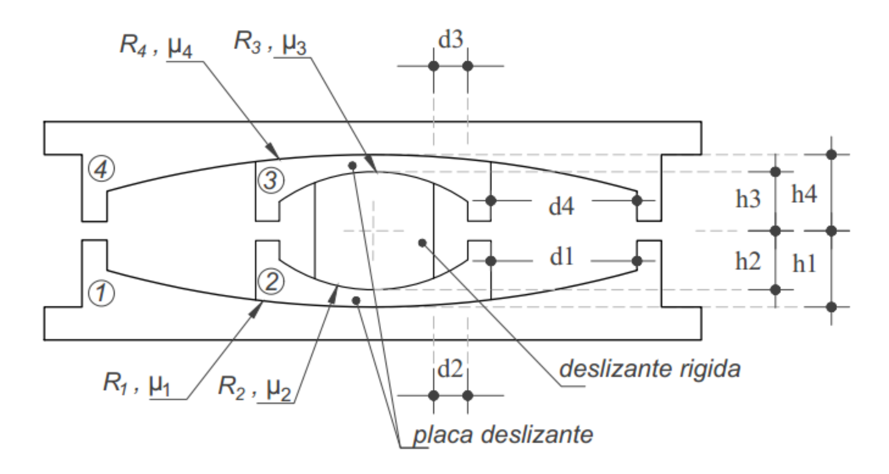


Figura 3 Nomenclatura de un aislador FPT.
Fuente: Constantinou *et al.* (2007, 2011)

Es importante conocer la capacidad de desplazamiento que tiene el aislador y en forma aproximada se puede decir que es igual a la suma de los cuatro desplazamientos d_i, y estos a su vez son función de la geometría del disipador. Pero estrictamente la capacidad de desplazamiento no es igual a la suma de los desplazamientos ya que existe curvatura. Más adelante se calcula esta capacidad de desplazamiento para los dos aisladores indicados en el apartado anterior.

La capacidad de desplazamiento, debe ser mayor a la demanda de desplazamiento que es función del sismo que se considera.

Un caso muy común de los aisladores es que: $R_1 = R_4$; y que $R_2 = R_3$; lo propio se tiene con las alturas: $h_1 = h_4$; y $h_2 = h_3$; y con los desplazamientos: $d_1 = d_4$; y $d_2 = d_3$. De igual manera el coeficiente de roce de las placas exteriores suele ser igual entre sí y lo propio sucede con las placas interiores.

Un modelo numérico que describe el funcionamiento del FPT, es considerar que este dispositivo, está compuesto por tres péndulos, que se presentan a continuación.

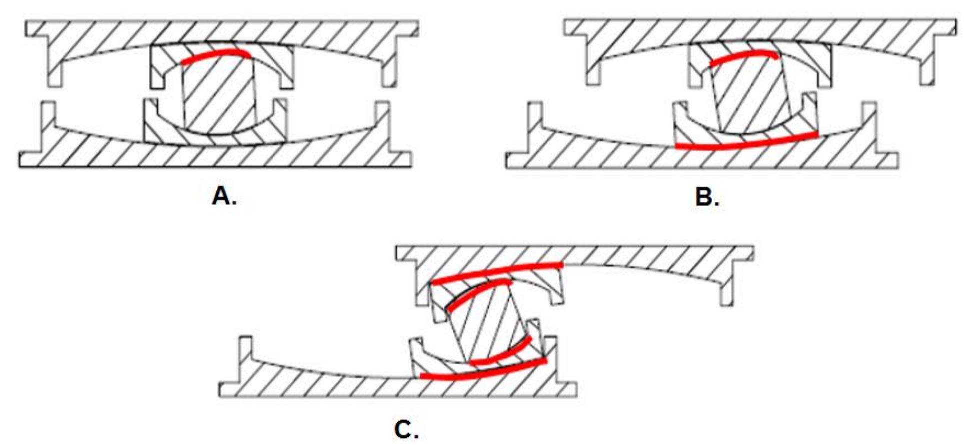


Figura 4 Modelo de funcionamiento del FPT; A. Movimiento en placas de radio R_2,R_3. B. Movimiento en placas R_1,R_3. Movimiento de placas R_1,R_4.
Fuente: Morales (2017)

- **Primer péndulo**

Al inicio del movimiento, se desliza la base rígida del aislador interior. Por lo tanto, el deslizamiento se produce en las superficies de radio R_2 y R_3, que se muestra en la figura 4 A. Para el aislador FPT se tiene:

$$L_1 = R_2 + R_3 - (h_2 + h_3) \tag{1}$$

$$T_1 = 2\,\pi \sqrt{\frac{L_1}{g}} \tag{2}$$

$$\Delta_1 = (\mu_1 - \mu_2)\, L_1 \tag{3}$$

Donde L_1 es la longitud del primer péndulo; T_1 su período fundamental; Δ_1 el desplazamiento lateral máximo; g es la aceleración de la gravedad.

- **Segundo péndulo**

Corresponde al caso en que el aislador se desliza en las placas 1 y 3, cuyos radios son: R_1,R_3, ver figura 4 B.

$$L_2 = R_1 + R_3 - (h_1 + h_3) \tag{4}$$

$$T_2 = 2\,\pi \sqrt{\frac{L_2}{g}} \tag{5}$$

$$\Delta_2 = (\mu_4 - \mu_1) L_2 \tag{6}$$

Donde L_2,T_2,Δ_2, son la longitud, período y desplazamiento del segundo péndulo.

- **Tercer péndulo**

El movimiento se da en las placas cuyos radios son: R_1, R_4. Aquí se tiene:

$$\boldsymbol{L_3 = R_1 + R_4 - (H + t_{c1} + t_{c2})} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{T_3 = 2\,\pi\,\sqrt{\frac{L_3}{g}}} \quad (8)$$

El significado de las variables indicadas a la derecha de la ecuación (7) se muestra en la figura5. Las restantes variables son: L_3,T_3, es la longitud y período de vibración del tercer péndulo. Constantinou *et al.* (2016).

- **Capacidad de desplazamiento**

Para encontrar la capacidad de desplazamiento d_t de los aisladores se debe tener en cuenta que se desplazan y rotan.

$$\boldsymbol{d_t = (d_2 + d_3)\frac{L_1}{L_{T1}} + (d_1 + d_4)\,\frac{L_2}{L_{T2}}} \quad (9)$$

Donde: d_i son la capacidad de desplazamiento que tiene el aislador interior y el exterior, ver figura 3; L_1,L_2 son las longitudes del primer y segundo péndulo; L_{T1} es la suma de los radios R_2 y R_3; L_{T2} es la suma de los radios R_1 y R_3.

Ahora bien, una vez que se ha indicado los tres péndulos del aislador FPT y la capacidad de desplazamiento, se debe manifestar que la nomenclatura utilizada por EPS (Earthquake Protection System) para identificar los aisladores es la siguiente: FPT$\boldsymbol{R_1}\boldsymbol{\emptyset_1}/b_4$-$\boldsymbol{R_2}/b_2$-$\boldsymbol{H}$**.** Donde R_1,R_2 son los radios de las placas 1 y 2; $\emptyset_1$, es el diámetro de las superficies cóncavas 1 y 4; b_4 es el diámetro del aislador interior; b_2 es el diámetro del deslizador rígido; H es la altura interior del deslizador rígido.

En la figura 5, se presentan las dimensiones del FPT8833/12-12/8-5 utilizado en la construcción de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE y en la Tabla 1, las dimensiones de éste aislador y del FPT8836/14-12/8-7. En la Tabla 2 se indican los coeficientes de roce que tienen los aisladores empleados en la ESPE. Lo importante de esta tabla es reconocer que el coeficiente de roce varía, tema que se analiza a continuación.

Cuando se ensayaron los 81 aisladores FPT, que luego fueron colocados en las construcciones de la ESPE, en cada ensayo se tuvieron diferentes valores de coeficiente de roce; 61 de estos aisladores fueron ensayados con una carga vertical de 250 T., los resultados de los ensayos se indican en la figura 6 A, para las placas exteriores (R_1, R_4) y en la figura 6 B, para las placas interiores. Nótese que en cada ensayo se obtuvo un valor menor, un valor mayor y el promedio de los dos. Cómo se aprecia para cada ensayo se tienen diferentes valores de roce; con los valores superiores se obtuvo el valor promedio que se indica en la tabla 2, con el nombre de **UB**, lo propio se hizo con los valores inferiores **LB** y medios que son los restantes valores de la indicada tabla.

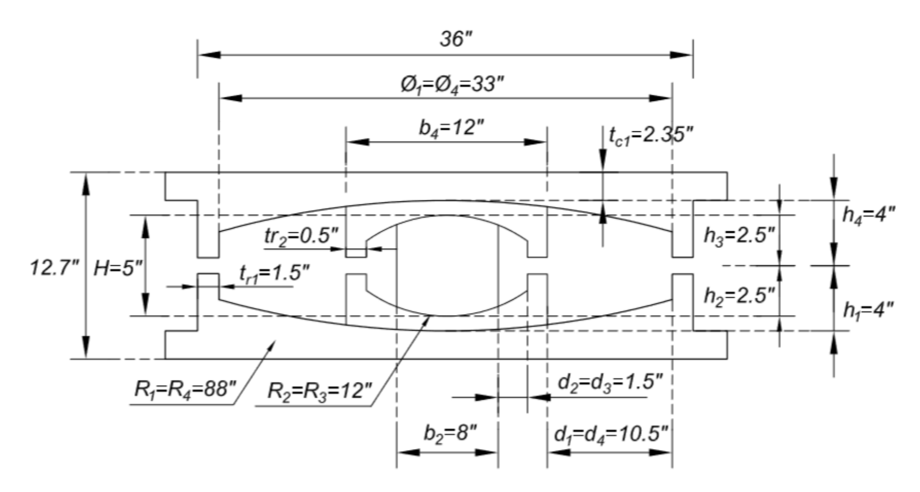


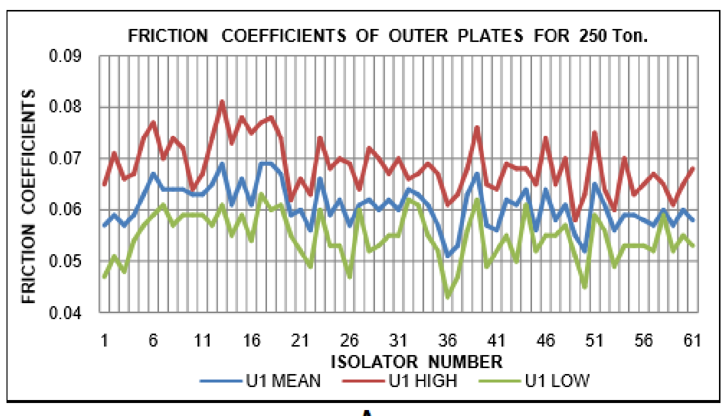
Figura 5 Geometría del aislador FPT8833/12-12/8-5.

Tabla 1 Geometría de aisladores FPT8833/12-12/8-5 y FPT8836/14-12/10-7

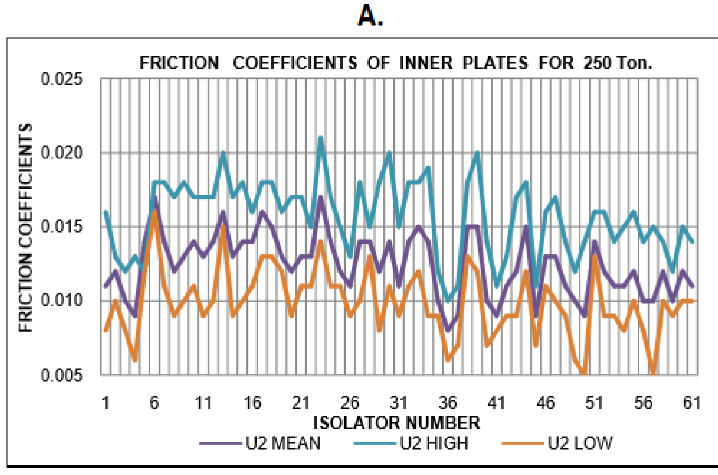
Identificación	FPT8833/12-12/8-5 **Valor en pulgadas y (cm)**	FPT8836/14-12/10-7 **Valor en pulgadas y (cm)**
Radio de curvatura de las placas 1 y 4 $R_1 = R_4$	88 (223.5)	88 (223.5)
Diámetro de las placas 1 y 4, $\emptyset_1 = \emptyset_4$	33 (83.82)	36 (91.44)
Diámetro de aislador interior, b_4	12 (30.5)	14 (35.56)
Radio de aislador interior $R_2 = R_3$	12 (30.5)	12 (30.5)
Diámetro de deslizador rígido b_2	8 (20.32)	10 (25.4)
Altura de aislador interior H	5 (12.7)	7 (17.78)
Espesor de topes exteriores t_{r1} $$t_{r1} = \frac{36-33}{2} = 1.5''$$	1.5 (3.81)	2 (5.08)
Espesor de topes interiores t_{r2}	0.5 (1.27)	0.5 (1.27)
Espesor de aislador interior en el centro t_{c2}	1.5 (3.81)	1.5 (3.81)
Espesor de aislador exterior en el centro t_{c1}	2.35 (5.97)	2.35 (5.97)
Capacidad de desplazamiento $d_1 = d_4$ $$d_1 = \frac{36-12-2*1.5}{2} = 10.5''$$	10.5 (26.67)	11 (27.94)
Capacidad de desplazamiento $d_2 = d_3$ $$d_2 = \frac{12-8-2*0.5}{2} = 1.5''$$	1.5 (3.81)	1.5 (3.81)
Altura de aislador interior $h_2 = h_3$ $$h_2 = \frac{H}{2} = \frac{5}{2} = 2.5''$$	2.5 (6.35)	3.5 (8.89)
Altura de aislador	12.7 (32.26)	13.5 (34.29)
Alturas $h_1 = h_4$ $$h_1 = 2.5 + 1.5 = 4''$$	4 (10.16)	5.0 (12.70)

Tabla 2 Coeficientes de roce

Propiedad	$\mu_2 = \mu_3$	μ_1	μ_4
Valor Superior **UB**	0.015	0.07	0.08
Valor Inferior **LB**	0.008	0.05	0.06
Valor Promedio	0.01	0.06	0.07



A.



B.

Figura 6 Coeficientes de roce encontrados en 61 aisladores ensayados con una carga vertical de 250 T., A. Coeficientes de roce en placas exteriores; B. Coeficientes de roce en placas interiores. Fuente: Delgado *et al.* (2017)

En las tablas 3 y 4, se presenta la longitud del péndulo; el período y el desplazamiento esperado. Para los aisladores FPT8833/12-12/8-5 y FPT8836/14-12/10-7, respectivamente. El desplazamiento se obtuvo en base a los coeficientes de roce nominales.

Tabla 3 Cálculo de longitud, período y desplazamiento en cada péndulo para FPT 8833/12-12/8-5

Péndulo	L_i	T_i	Δ_i
1	$L_1 = 12 + 12 - 5$ $L_1 = 19'' = 48.26\ cm$	$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{48.26}{980}}$ $T_1 = 1.39\ s.$	$\Delta_1 = (0.06 - 0.01)19$ $\Delta_1 = 0.95''$
2	$L_2 = 88 + 12 - (4 + 2.5)$ $L_2 = 93.5'' = 237.49\ cm$	$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{237.49}{980}}$ $T_2 = 3.09\ s.$	Δ_2 $= 0.95 + (0.07 - 0.06)93.5$ $\Delta_2 = 1.885''$
3	L_3 $= 88 + 88 - (5 + 2 * 2.35)$ $L_3 = 166.3'' = 422.40\ cm$	$T_3 = 2\pi\sqrt{\frac{422.40}{980}}$ $T_3 = 4.125\ s$	

Tabla 4 Cálculo de longitud, período y desplazamiento en cada péndulo para FPT 8836/14-12/10-7

Péndulo	L_i	T_i	Δ_i
1	$L_1 = 12 + 12 - 7$ $L_1 = 16'' = 40.64\ cm$	$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{40.64}{980}}$ $T_1 = 1.28\ s.$	$\Delta_1 = (0.06 - 0.01)16$ $\Delta_1 = 0.96''$
2	$L_2 = 88 + 12 - (4 + 2.5)$ $L_2 = 93.5'' = 237.49\ cm$	$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{237.49}{980}}$ $T_2 = 3.08\ s.$	Δ_2 $= 0.96 + (0.07 - 0.06)93.5$ $\Delta_2 = 1.895''$
3	L_3 $= 88 + 88 - (7 + 2 * 2.35)$ $L_3 = 164.3 = 417.32\ cm$	$T_3 = 2\pi\sqrt{\frac{417.32}{980}}$ $T_3 = 4.10\ s$	

En el diseño del tamaño de los aisladores FPT es muy importante, conocer los períodos que se acaban de obtener para comparar con los períodos que demandan los sismos de diseño y máximo considerado, de esa manera se tiene una idea bastante acertada de la fase en que se encuentra trabajando. Pero a más de lo indicado, lo más importante es conocer la capacidad de desplazamiento lateral que tienen los aisladores para el efecto se copia a continuación la ecuación (9). El significado de las variables ya fue indicado.

$$d_t = (d_2 + d_3)\frac{L_1}{L_{T1}} + (d_1 + d_4)\frac{L_2}{L_{T2}}$$

- FPT8833/12-12/8-5

$$d_t = (1.5 + 1.5)\frac{19}{(12 + 12)} + (10.5 + 10.5)\frac{93.5}{(88 + 12)} = 22.01'' = 56\ cm$$

- FPT8836/14-12/10-7

$$d_t = (1.5+1.5)\frac{16}{(12+12)} + (11.0+11.0)\ \frac{93.5}{(88+12)} = 22.57'' = 57.33\ cm$$

En la figura 7 se presenta la curva constitutiva del aislador FPT8833/12-12/8-5 (utilizado en la ESPE) hallado por EPS (2015) para los valores de roce que están indicados con la letra f, utilizando el modelo de 5 fases de Fenz y Constantinou (2007, 2008). Los valores que se presentan son similares a los presentados en la tabla 3 y la capacidad de desplazamiento del aislador es de 56.6 cm, valor similar a los 56 cm, hallado.

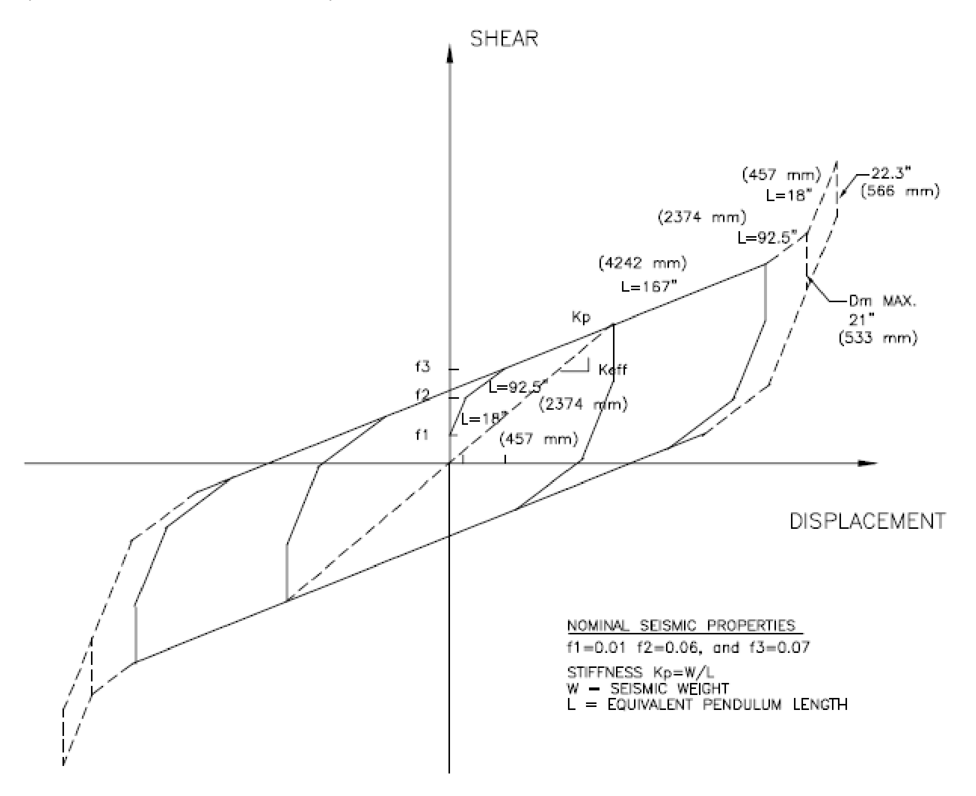


Figura 7 Curva de histéresis corte desplazamiento de aislador FPT8833/12-12/8-5 Utilizado en las estructuras de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.
Fuente: EPS (2015)

Cuando se llega al desplazamiento lateral de 56.6 cm, el deslizador central topa el anillo exterior (cómo sucedió en la Pila 12) por lo que no es conveniente que ante un sismo con período de retorno de 475 o 975 años llegue a ese valor, talvez se puede esperar que llegue a ese valor máximo de 56.6 cm, ante un sismo con período de retorno de 2475 años, que tiene muy poca probabilidad de ocurrencia.

En Lima, se construyó el Hospital "El Callao", con aisladores FPT8833/12-12/8-5 (igual que los utilizados en la ESPE) pero con coeficientes de roce mayores. Por cierto en las figuras 7 y 8, f_1 es el coeficiente de roce de las placas interiores y f_2, f_3, de las placas exteriores. Los aisladores empleados en el Hospital de Lima,

tienen mayores coeficientes de roce y como tal mayor capacidad de desplazamiento como se observa en la figura 8. Nótese que los coeficientes de roce de las placas interiores son 0.05 y de las placas exteriores 0.07. **Con esto la capacidad de desplazamiento llega a 65.7 cm.** De tal manera que solamente con incrementar el coeficiente de roce de las placas interiores a 0.05 se incrementa notablemente la capacidad de desplazamiento.

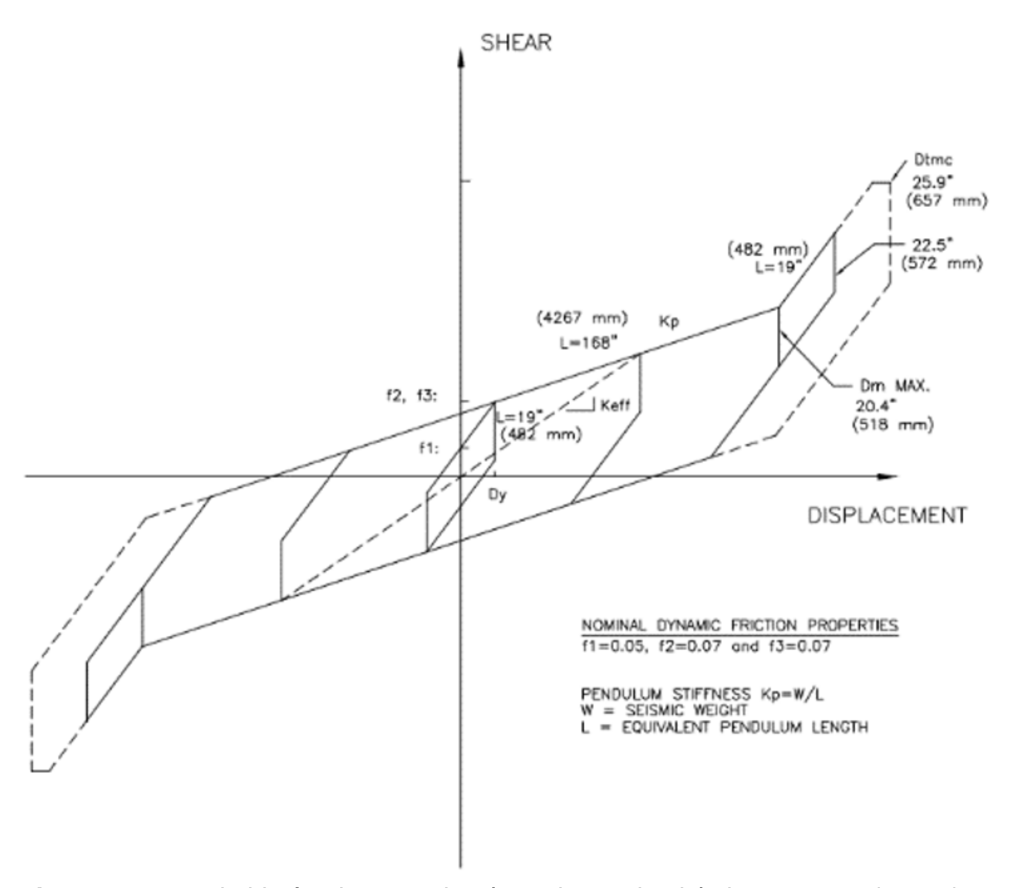


Figura 8 Curva de histéresis corte desplazamiento de aislador FPT8833/12-12/8-5 Utilizado en las estructuras de Hospital de Lima
Fuente: EPS (2016)

3. PELIGROSIDAD SÍSMICA Y ESPECTROS DE ANÁLISIS

Parra (2016) identifica tres zonas fuentes asociadas a la subducción con bajo ángulo de buzamiento y las denomina IFN, IPC, IFS, las mismas que se muestran en la figura 9 A; el Hospital de Quinindé se halla en la zona fuente IFN, donde históricamente se registraron los terremotos de 1906 de magnitud 8.8; de 1958 de magnitud 7.6 de 1979 de magnitud 8.0 y el de 2016 de magnitud 7.8 pero un poco más al Sur se tiene el terremoto de 1942 de magnitud 7.8 De tal forma que fue un acierto diseñar el Hospital con aisladores sísmicos.

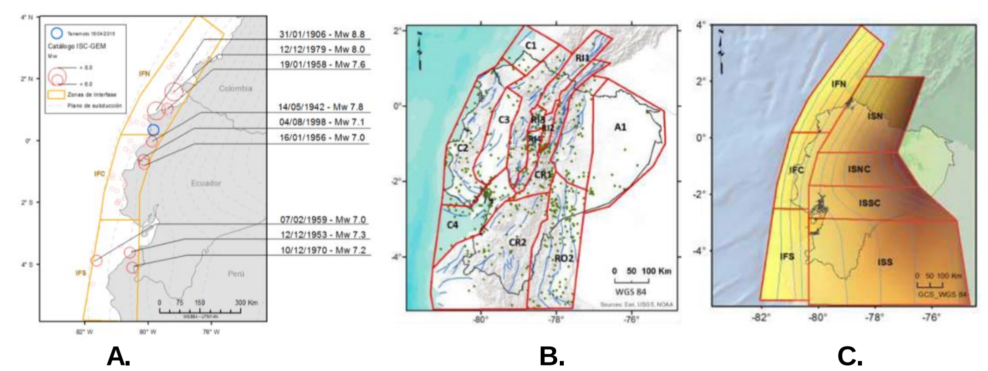


Figura 9 A. Zonas Fuentes de Subducción; B. Zonas Fuentes asociadas a sismos corticales; C. Zonas Fuentes: interplaca e intraplaca.
Fuente: Parra (2016)

En la figura 9 B., se presenta las zonas fuentes asociadas a fallas corticales y en la figura 9 C. se indican las zonas fuentes interplaca que constan en la figura 9 A y las intraplaca.

En Aguiar *et al.* (2018) se presenta con detenimiento el estudio de peligrosidad sísmica realizado aquí solamente se indican los resultados obtenidos. Pero antes se debe manifestar que se trabajó con los modelos de movimientos fuertes propuestos por Zhao *et al.* (2006); Idini *et al.* (2017); Montalva *et al.* (2017). El primero de los modelos presenta leyes de atenuación para sismos: interplaca, corticales e intraplaca; en cambio los dos siguientes modelos presentan leyes para sismos: corticales e intraplaca; en este caso para sismos interplaca se utilizó las propuestas por Zhao *et al.* (2006).

En resumen, se encontró espectros de riesgo sísmico uniforme para tres períodos de retorno T_r de: 475, 975 y 2475 años; de tres formas denominadas en la figura 10, como ZZZ; ZII; ZMM. La primera letra se refiere a sismos interplaca, la segunda a corticales y la tercera a intraplaca. Finalmente para cada período de retorno se trabaja con los valores promedios, los mismos que se indican en cada uno de los espectros de la figura 10 y en la tabla 5.

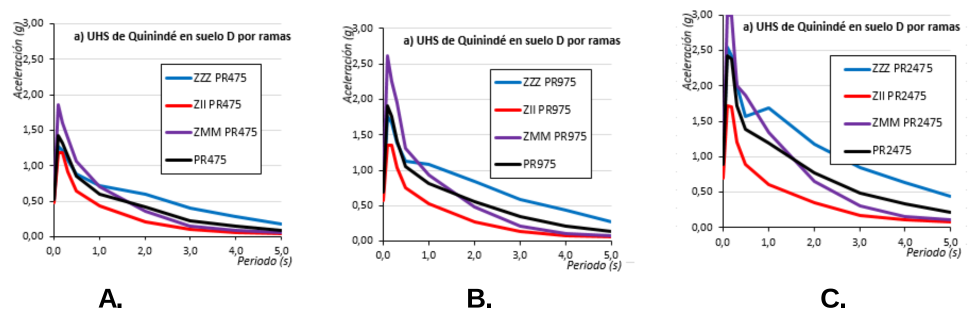


Figura 10 Espectros de Peligro Sísmico Uniforme hallados para el sitio de emplazamiento del Hospital de Quinindé; A. Para período de retorno de 475 años; B. Período de retorno de 975 años; C. Período de retorno de 2475 años.
Fuente: Aguiar *et al.* (2017).

Tabla 5 Ordenadas Espectrales expresadas en función de la gravedad, para el sitio del Hospital de Quinindé.

$T\ (s)$	$T_r = 475\ (g)$	$T_r = 975\ (g)$	$T_r = 2475\ (g)$
0.0	0.52	0.69	0.89
0.1	1.42	1.91	2.42
0.2	1.32	1.76	2.38
0.3	1.14	1.42	1.72
0.5	0.85	1.06	1.39
1.0	0.60	0.82	1.20
2.0	0.41	0.56	0.77
3.0	0.23	0.34	0.49
4.0	0.14	0.21	0.33
5.0	0.09	0.14	0.21

4. METODO SIMPLIFICADO LINEAL

El Método simplificado lineal, para el análisis sísmico de estructuras con aisladores de base, propuesto por ASCE 7-10 considera que la superestructura va a desplazarse como cuerpo rígido; que el período del sistema de aislación es mucho más grande que el período de la superestructura y que el amortiguamiento del sistema de aislación es mayor que el de la estructura. Con estas consideraciones se puede considerar al sistema como de un grado de libertad con un modelo constitutivo del aislador bilineal, como el indicado en la figura 11.

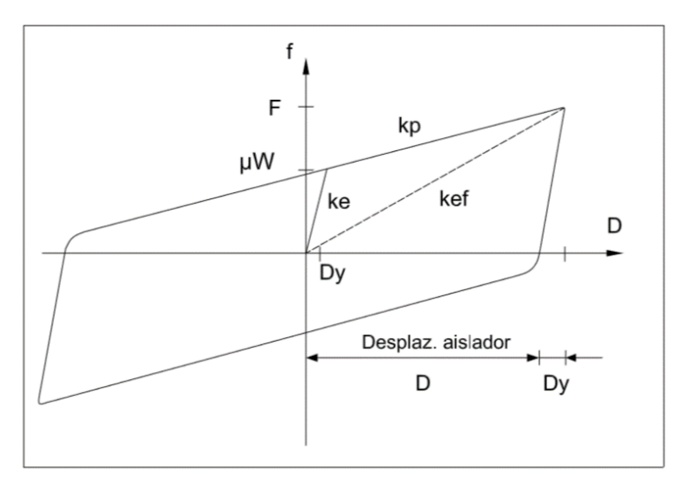


Figura 11 Simplificación del diagrama de histéresis Bilineal para el FPT.

Para el diagrama bilineal indicado en la figura 11, en Aguiar *et al.* (2008) se demuestra que la rigidez efectiva k_{ef} y el amortiguamiento equivalente β vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$k_{ef} = \frac{W}{R} + \frac{\mu\, W}{D} \tag{10}$$

$$\beta = \frac{2}{\pi}\left[\frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}}\right] \quad (11)$$

Donde W es el peso que gravita sobre el aislador; R es el radio de curvatura; μ es el coeficiente de roce; D es el desplazamiento. Ahora bien, en el método simplificado se considera.

$$\mu = \mu_1 - (\mu_1 - \mu_2)\frac{R_{ef2}}{R_{ef1}} \quad (12)$$

$$R = R_{\,ef1} + R_{ef4} \quad (13)$$

$$R_{efi} = R_i - h_i \quad (14)$$

Por otra parte, el período del sistema de aislación, se halla con la siguiente ecuación.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{W}{k_{ef}\,g}} \quad (15)$$

Los espectros se encuentran para 5% de amortiguamiento, ahora cuando se tienen aisladores en una estructura, el amortiguamiento β es mayor al 5%, por lo que se debe encontrar un factor B por el que se debe dividir el espectro del 5% para hallar el espectro con amortiguamiento β. En la tabla 6 se indican los valores de B, para diferentes valores de amortiguamiento β, recomendados por el ASCE 7-10.

Tabla 6 Valores de reducción de espectro por B. Fuente: ASCE 7-10

β (%)	5	10	20	30	40
B	1.00	1.20	1.50	1.70	1.90

Para encontrar el desplazamiento D se aplica la definición de Pseudo espectro, con lo que se encuentra.

$$D = \left(\frac{T^2}{4\,\pi^2}\right)\frac{S_a}{B}$$

Pero se conoce que:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}(g)$$

Luego:

$$D = \left(\frac{S_{D1} * g}{4\,\pi^2}\right)\frac{T}{B} \quad (16)$$

Donde S_{D1} es el coeficiente de la aceleración de la gravedad para un período de 1 segundo. Esto presupone que el espectro de velocidad es constante a partir de 1 segundo.

El cálculo del desplazamiento se realiza en forma interactiva. En efecto se inicia imponiéndose un valor de desplazamiento, con el cual se obtiene la rigidez efectiva, el amortiguamiento equivalente y el período efectivo T, con este valor se halla el desplazamiento D en función de S_{D1} y B; se compara el desplazamiento impuesto con el calculado y se continúa hasta lograr una convergencia. Se recomienda aplicar el método de la bisección para que la convergencia sea más rápida. Aguiar *et al.* (2016, a)

En el caso de construir con aisladores de triple péndulo, se trabaja con las dimensiones de los utilizados en los Puentes que es FPT8836/14-12/10-7. Pero los coeficientes de roce son los siguientes:

- **Alternativa 1**

$$\boldsymbol{\mu_2 = 0.05 \qquad \mu_1 = 0.08}$$

- **Alternativa 2**

$$\boldsymbol{\mu_2 = 0.05 \qquad \mu_1 = 0.07}$$

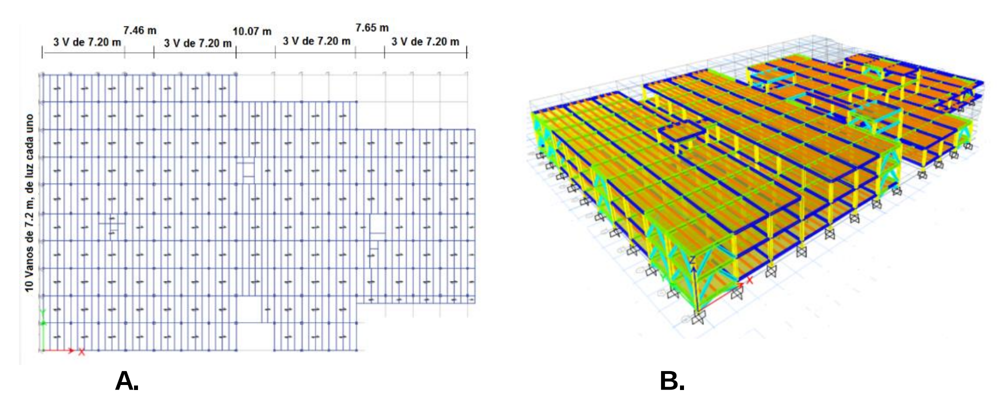
En la tabla 7 se indican las respuestas máximas de desplazamiento D, que se hallan al aplicar el Método Simplificado lineal, con cada de los tres espectros de peligro sísmico uniforme hallados para períodos de retorno T_r de 475, 975 y 2475 años. Se indica además la rigidez efectiva K_{ef}, el período T, el amortiguamiento β. Para las dos alternativas. Evidentemente que lo óptimo es trabajar con la alternativa 1. Se destaca que el aislador es el FPT8836/14-12/10-7, que todavía no se indica su capacidad máxima de desplazamiento pero será mayor a los 65.7 cm, que se tiene con el aislador más pequeño FPT8833/12-12/8-5 (con coeficientes de roce 0.05 en las placas interiores y 0.07 en las placas exteriores, utilizado en Hospital el Callao de Perú)

Tabla 7 Desplazamientos esperados ante espectros de riesgo sísmico uniforme para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.

T_r	Alternativa 1: $\mu_2 = 0.05$ $\mu_1 = 0.08$				Alternativa 2: $\mu_2 = 0.05$ $\mu_1 = 0.07$			
	K_{ef} (T/m)	T (s)	β (%)	D (cm)	K_{ef} (T/m)	T (s)	β (%)	D (cm)
475	77.44	2.54	0.344	20.09	67.50	2.72	0.358	22.34
975	56.58	2.97	0.305	35.44	51.41	3.12	0.271	38.70
2475	43.99	3.38	0.210	66.19	41.29	3.48	0.182	71.82

El Hospital de Quinindé, es una estructura de dos pisos, con una cubierta accesible, que tiene luces de 7.2 m, (la mayor parte de las luces) es una estructura irregular en planta como se observa en la figura 12 A, donde se indican todas las luces de los vanos. **Se van a colocar 144 aisladores** sobre pedestales que saldrán de la cimentación. La altura de los entrepisos es de 4.50 m, y la altura de la cubierta

de la grada es de 3.0m. Adicionalmente se debe indicar que para inspección y mantenimiento de los aisladores se tendrá un subsuelo de 1.50 m, de alto.



A. **B.**

Figura 12 Hospital de Quinindé; A. Vista en Planta; B. Vista en elevación.

En pasillos el NEC-15 recomienda que la carga viva sea de 400 kg/m^2, se consideró esta carga en la planta baja, que viene a ser la carga sobre la losa de aislación; para el primer piso alto se trabajó con una carga de 300 kg/m^2; en realidad en las habitaciones la carga se debió considerar de 200 kg/m^2 pero existe el área de quirófanos donde la carga viva es mayor y existen corredores o pasillos; por todo esto se decidió para el análisis sísmico trabajar con una carga viva de 300 kg/m^2 para todo el piso.

La losa del segundo piso es la terraza que es accesible, la carga viva para este piso es de 200 kg/m^2. Es importante que se tome en cuenta, que no está contemplado hacer ampliaciones. Normalmente sucede que con el transcurso del tiempo hacen ampliaciones, sin técnica, lo hacen con acero de lámina delgada e incrementan la carga y tienen mal comportamiento, un caso es el Hospital Rodríguez Zambrano de la ciudad de Manta, en este hospital se tuvo fisuras en las conexiones de las columnas y vigas doble "G" (Aguiar *et al.* 2006, b).

El cortante basal V_b en el Método Simplificado Lineal, se obtiene con la siguiente ecuación.

$$V_b = \sum K_{ef} \ D \tag{17}$$

Todas las variables han sido ya definidas y están calculadas en la tabla 7. Es importante destacar que se está trabajando con un valor $R = 1$, en la ecuación (17) siendo R el factor de reducción de respuesta por comportamiento inelástico; el aislador va a estar sobre pedestales, estos deben trabajar en el rango elástico. Para la superestructura si se va a considerar $R = 2$, que corresponde a la sobre resistencia de la estructura.

Se denomina V_s al cortante basal que ingresa a la superestructura. Evidentemente que este valor debe ser menor a V_b pero se lo considera igual (con

(18)

la acotación que se indica posteriormente). Lo que si se considera es la sobre resistencia. Por lo tanto, se tiene:

$$V_s = \frac{\sum K_{ef} \ D}{R}$$

La fuerza lateral F_i es función de la carga vertical actuante en cada piso y de la altura de piso, pero una aproximación bastante buena es encontrar la fuerza lateral F_i de la siguiente manera.

$$F_i = \frac{V_s}{NP} \quad (19)$$

Donde NP es el número de pisos. La acotación que se indicaba anteriormente es que en la ecuación (19) se va a considerar $NP = 3$, de esta manera se halla la fuerza lateral que gravita en la losa de aislación que se abrevia LA; en la losa del primer piso L1; y en la losa del segundo piso L2. Pero existe una losa adicional que es la cubierta de grada esta se denomina L3 y se considera un 5% del valor L2. Los resultados se indican en las tablas 8 y 9, para la alternativa 1 y 2, respectivamente.

Tabla 8 Fuerzas estáticas equivalentes por sismo, en Alternativa 1

T_r	V_b (T.)	V_s (T.)	LA (T.)	L1 (T.)	L2 (T.)	L3 (T.)
475	2230.3	1115.2	371.3	371.3	371.3	18.58
975	2892.6	1446.3	482.1	482.1	482.1	24.10
2475	4192.8	2096.4	698.8	698.8	698.8	34.94

Tabla 9 Fuerzas estáticas equivalentes por sismo, en Alternativa 2

T_r	V_b (T.)	V_s (T.)	LA (T.)	L1 (T.)	L2 (T.)	L3 (T.)
475	2171.4	1085.7	361.9	361.9	361.9	18.09
975	2865.0	1432.5	477.5	477.5	477.5	23.87
2475	4629.1	2314.6	771.5	771.5	771.5	38.57

El Método simplificado de análisis que se acaba de presentar, es referencial, que reporta bastante bien los desplazamientos esperados en estructuras que son regulares en planta y elevación. El Hospital de Quinindé es una estructura irregular en planta y elevación, como se verá en el siguiente artículo pero para un prediseño de los aisladores, vale la pena utilizarlo, teniendo muy en cuenta que se debe realizar un análisis espacial considerando la geometría de la estructura.

5. NO LINEAL CON CURVA DE HISTÉRESIS DE FPT

En este apartado se realiza un análisis no lineal del Hospital de Quinindé con aisladores sísmicos considerando que la superestructura se comporta como cuerpo rígido, de tal manera que el sistema tiene un grado de libertad que es el movimiento del aislador.

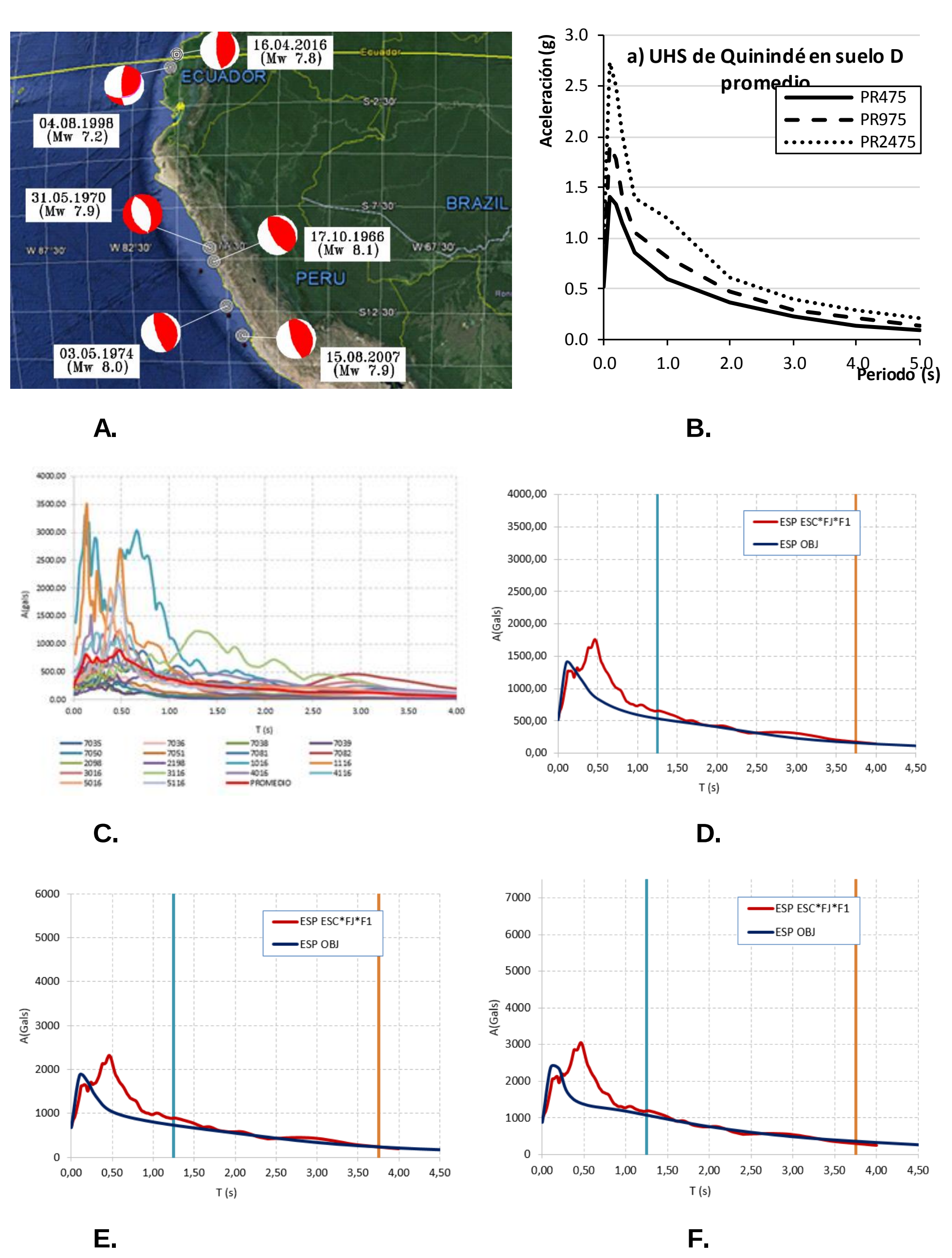


Figura 13 A. Sismos considerados B. Espectros encontrados en estudio de peligrosidad sísmica; C. Espectros de los sismos seleccionados; D. Espectro promedio escalonado para 475 años; E. Escalonado para 975 años; E Espectro promedio escalonado para 2475 años.

5.1 Sismos de análisis

Los sismos con los cuales se va a encontrar la respuesta no lineal del sistema de aislación se indican en la figura 13 A, se entiende que en la vida útil del

Hospital un terremoto similar puede ocurrir. Pero no se puede aplicar tal cual como fueron registrados estos sismos, debido a que el espectro promedio va a ser diferente que los encontrados en el estudio de Peligrosidad Sísmica, ver figuras 13 B, y 13 C. Por esta razón, estos registros fueron escalados a los espectros hallados en el estudio de peligrosidad sísmica para períodos de retorno, en la figura 13 D, se indica para 475 años; en la 13 E, para 975 años y en la 13, para 2475 años.

En las figuras 13 D, E y F, con líneas verticales se indica el rango de interés para el cual fueron escalados los registros de los sismos considerados; en ese rango de períodos el espectro promedio escalado es ligeramente más grande que el espectro objetivo indicado en la figura 13 B., para el efecto los registros deben multiplicarse por los factores mostrados en la tabla 10. (NIST, 2011)

Tabla 10 Factores de escalamiento encontrados en el estudio.

Sismo	$T_r = 475$ años	$T_r = 975$ años	$T_r = 2475$ años
EQ1	3.20	3.50	3.70
EQ2	4.00	4.20	4.40
EQ3	3.10	3.60	4.00
EQ4	1.00	1.15	1.25
EQ5	1.71	2.09	3.26
EQ6	1.50	2.17	3.03
EQ7	1.89	2.71	3.77
EQ8	2.15	2.77	4.13
EQ9	0.55	1.00	1.25
EQ1 Perú (1966)		EQ2 Perú (1970)	
EQ3 Perú (1974)		EQ4 Perú (2007)	
EQ5 Ecuador (1998)		EQ6 Manta, Ecuador (2016)	
EQ7 Chone, Ecuador (2016)		EQ8 Portoviejo, Ecuador (2016)	
Pedernales, Ecuador (2016)			

El rango en el cual se realizó el escalamiento, es el siguiente.

$$0.5\, T_{DE} \leq T \leq 1.25\, T_{MCE} \quad (19)$$

Donde T es el período; T_{DE} es el período de la estructura con aisladores asociado al sismo de diseño; T_{MCE} es el período asociado al sismo máximo considerado (ASCE- 10. NIST, 2011) Se estima que $T_{DE} = 2.5\ s;\ T_{MCE} = 3.0\ s$.

5.2 Modelos del comportamiento de un disipador FPT

Fenz y Constantinou (2007,2008) consideran cinco fases en el funcionamiento del FPT, las tres primeras se indicaron en la figura 4; pero en las figuras 7 y 8 se presentan las 5 fases; en la fase cuatro el aislador interior topa uno de los topes exteriores y trabaja como el péndulo dos y en la fase cinco el aislador interior topa el borde inferior y superior, por lo que el movimiento se da en el péndulo

1. Ahora, para tener presente las cuatro primeras fases del comportamiento de un aislador de triple péndulo; en la figura 14 se las indica.

Al considerar el caso frecuente de la geometría de los FPT en que se reducen las propiedades de 12 a 6, Mc Vitty y Constantinou (2015) presentan un modelo más sencillo de análisis en que se reduce el comportamiento de seis fases a tres fases. Para cada una de las fases se tienen ecuaciones para definir la rigidez efectiva en función del desplazamiento esperado, que de igual manera se halla en forma iterativa; se encuentra también el amortiguamiento equivalente.

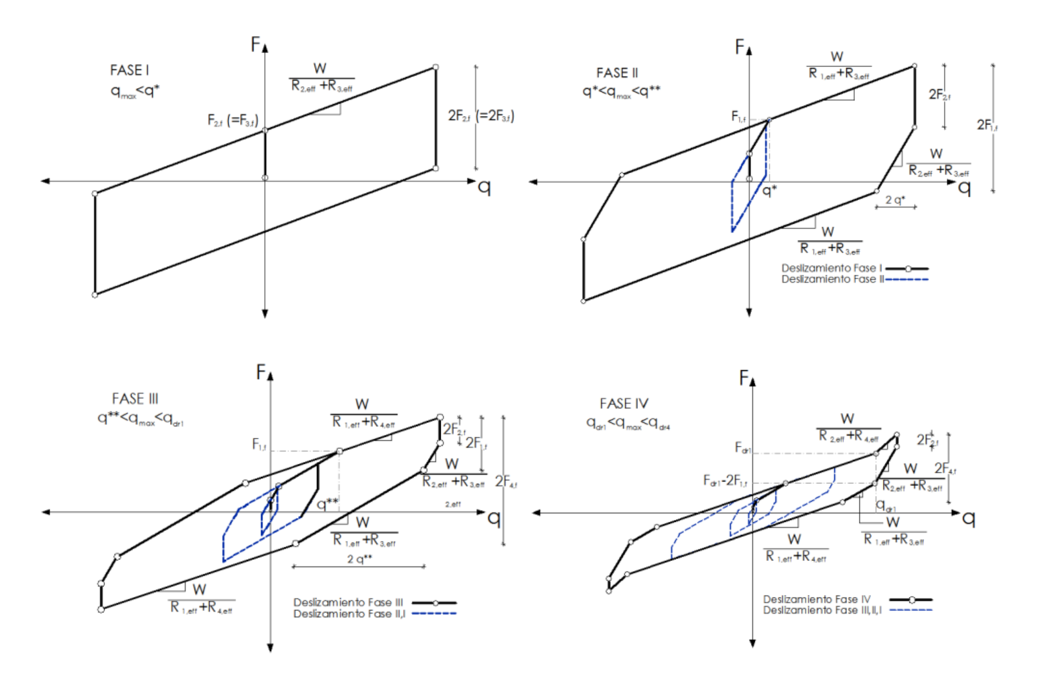


Figura 14 Fases del modelo de Fenz y Constantinou (2007) para el aislador FPT.

Lo cierto es que los aisladores trabajan fundamentalmente, en la fase III del modelo de Fenz y Constantinou (2007) y este puede modelarse, en forma aproximada como un modelo bilineal, presentado en la figura 11.

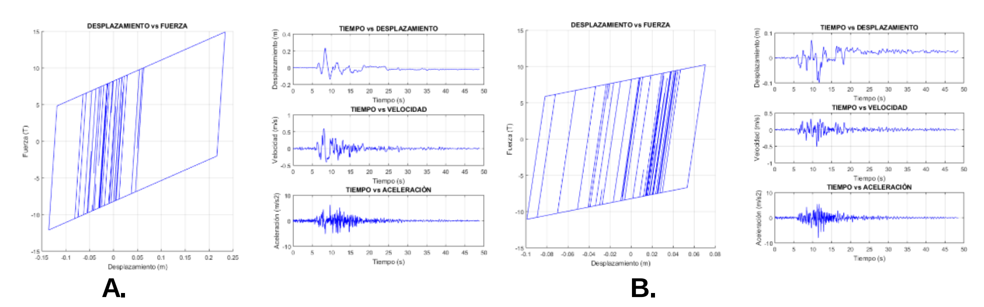
5.3 Respuesta no lineal

Se encontró la respuesta no lineal, del sistema de aislación con cada uno de los registros de aceleración, utilizando los factores de escalamiento indicados en la tabla 10. (Aguiar y Morales, 2016). A manera de ejemplo, en la figura 15 se presenta la curva constitutiva fuerza-desplazamiento y las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante los registros de aceleración obtenidos en Manta, escalados al espectro objetivo cuyo período de retorno es de 475 años (Los registros se multiplican por 1.5, ver tabla 10).

Interesa conocer el desplazamiento máximo y ver que este sea menor que la capacidad de desplazamiento del aislador FPT8836/14-12/10-7, con coeficientes

de roce 0.05 (placas interiores) y 0.07 (placas exteriores). Los valores máximos se indican en la tabla 11.

Se calculó para una carga vertical sobre el aislador de 121 T., que se obtiene considerando tres pisos: de aislación, planta altas 1 y 2. Existen aisladores en los cuales la carga es menor ya que solo tienen dos pisos: de aislación y primera planta alta.



A. **B.**

Figura 15 Curva constitutiva, respuesta en desplazamientos, velocidad y aceleración ante registro de Manta del terremoto de 2016, escalado a espectro objetivo con período de retorno de 475 años. A. Respuesta ante componente E-W; B. Respuesta ante componente N-S.

Tabla 11 Respuestas máximas de desplazamientos halladas con sismos escalados para aislador FPT 8836/14-12/10-7 con coeficientes de roce de 0.05 y 0.07, con carga vertical de 121 Ton.

Sismo	$T_r = 475$		$T_r = 975$		$T_r = 2475$	
	E-W	**N-S**	**E-W**	**N-S**	**E-W**	**N-S**
EQ1(cm)	4.66	14.98	6.43	19.31	10.43	25.78
EQ2(cm)	4.81	4.03	5.03	4.45	5.91	5.65
EQ3(cm)	5.03	9.52	6.71	9.69	7.93	12.93
EQ4(cm)	17.07	28.49	20.35	47.88	24.11	65.81
EQ5(cm)	8.07	6.22	8.35	7.67	14.51	14.86
EQ6 (cm)	23.35	9.91	38.53	16.95	56.05	25.31
EQ7 (cm)	31.06	25.92	44.72	36.65	51.92	37.46
EQ8(cm)	33.37	23.31	45.68	33.36	51.20	40.93
EQ9(cm)	11.01	4.68	22.75	11.91	24.64	27.50

La capacidad de desplazamiento del aislador FPT8836/14-12/10-7 con coeficientes de roce de 0.05 (placas interiores) y 0.07 (placas exteriores) es de **68.10 cm**, valor hallado utilizando modelo de 5 fases de Fenz y Constantinou (2007).

6 AISLADOR DE PENDULO FRICCIONAL ORTOTROPICO

La empresa SPD (Sistemas de Protección Dinámicos) domiciliada en Chile desde hace más de una década fabrica el dispositivo de aislamiento sísmico tipo Péndulo Friccional de Tipo Ortotrópico (PFOT), el mismo que se lo presenta en la figura 16, y vale la pena conocerlo para tener otra opción de reforzamiento a menor costo. Funciona como dos péndulos friccionales simples ortogonales entre sí (de allí su nombre).

En la figura 16 A se muestra el aislador completo. Por su parte en la figura 16 B se muestra sin el cuerpo superior, lo que permite observar los deslizadores y la rótula interna. Al sacar el deslizador superior se puede observar en la figura 16 C la rótula interna con insertos de teflón reforzado. Finalmente en la figura 16 D se muestra un esquema con todos los componentes del aislador, y son: 1. cuerpo superior; 2. cuerpo inferior; 4. deslizador superior; 5. deslizador inferior; 6. Rótula interna; 8. superficie de deslizamiento de acero inoxidable; 11. Pernos de anclaje. Los cuerpos inferior y superior tienen topes de acero dimensionados para impedir que los deslizadores se salgan de la superficie de deslizamiento.

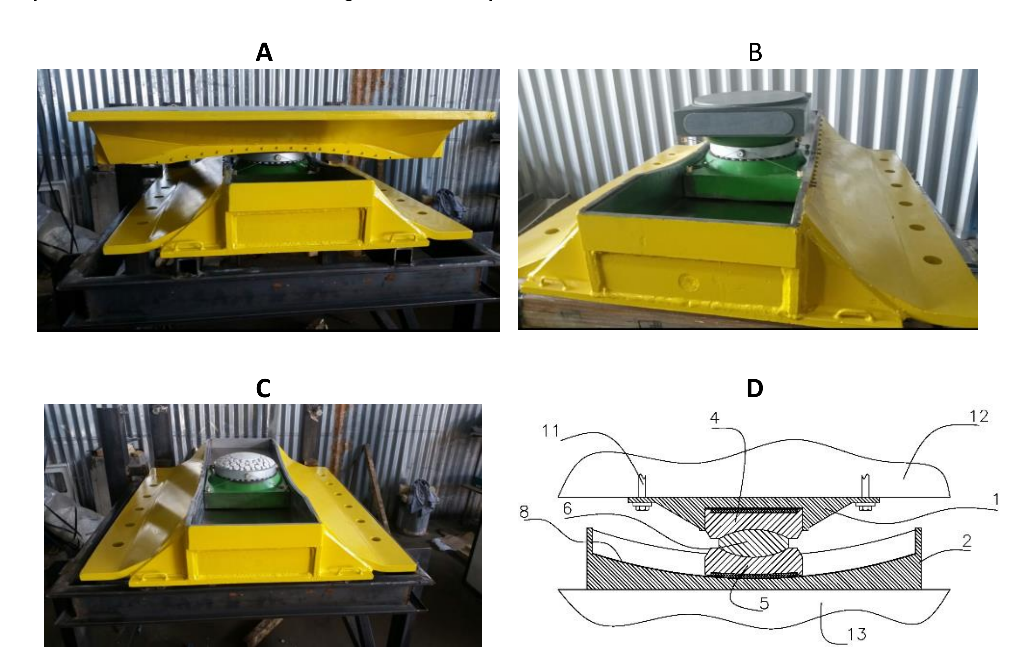


Figura 16 A. Aislador de Péndulo Friccional Ortotrópico completo; B. Cuerpo Inferior, deslizador inferior, rótula y deslizador superior; C. Rótula con insertos de teflón reforzado; D. Esquema con partes del dispositivo.

En la Figura 17 se muestra esquemáticamente el dispositivo PFOT en posición desplazada, para un desplazamiento D_X en dirección X, y D_Y en dirección Y. Nótese que en la dirección X el dispositivo se comporta como un péndulo friccional de simple curvatura con superficie de deslizamiento inferior, mientras que en la dirección Y se comporta como un péndulo friccional de simple curvatura con superficie de deslizamiento superior.

La Tabla 12 muestra los resultados del proceso de diseño para dos alternativas de PFOT, en las que se ha considerado un coeficiente de roce μ=0.07, y radios de curvatura efectiva R_{eff}=400 cm y 300 cm, respectivamente. En ambos casos los cuerpos superior e inferior del dispositivo tienen un largo de 140 cm y un ancho de 80 cm.

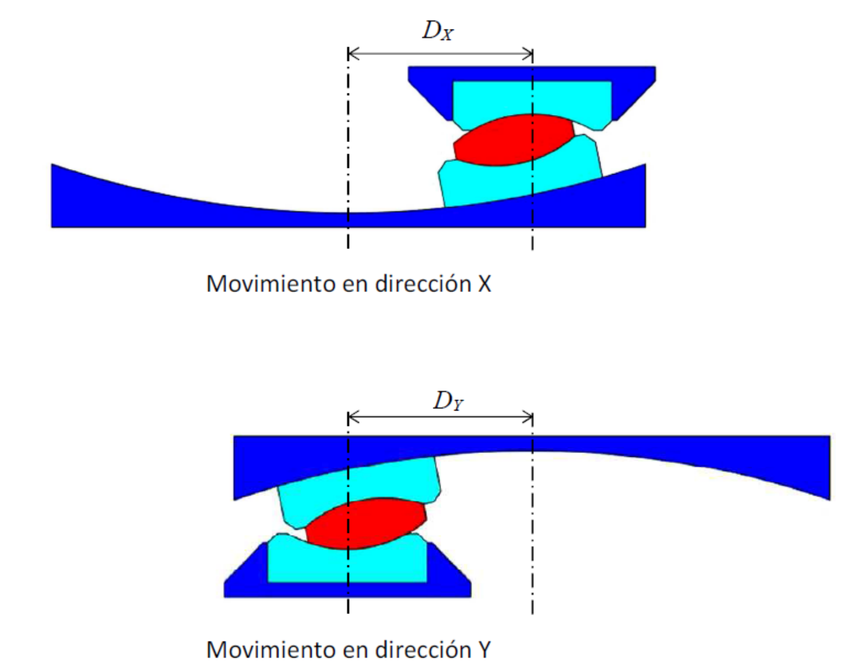


Figura 17. Dispositivo PFOT en posición desplazada, para un desplazamiento D_X en dirección X, y D_Y en dirección Y. En color azul los cuerpos superior e inferior, en color celeste los deslizadores superior e inferior, y en color rojo la articulación interna.

7 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Si se encuentran dos productos que tienen diferentes precios, se piensa que el que tiene un menor costo, es de mala calidad o al menos se tiene la duda de su eficiencia. Esto puede suceder con los aisladores de triple péndulo de fricción FPT, fabricado en los Estados Unidos de Norte América, y el Péndulo Friccional de Tipo Ortotrópico (PFOT) fabricado en Chile. El segundo tiene un costo que es por lo menos 40% más bajo y como saber que es eficiente. Para ello se debe ver las curvas constituivas, obtenidas experimentalmente, en el Anexo 1, se presentan estas curvas para los aisladores que están colocados en un edificio de San Juan, Argentina.

Cuando se compra un aislador se le dice al proveedor, deseo un aislador que ante una carga vertical dada tenga tal desplazamiento y es más uno le indica cómo se debe realizar el ensayo (test de carga). El proveedor antes de proceder a realizar el ensayo hace un estudio analítico muy detallado en base a su producto y en el ordenador ve el comportamiento esperado (Al menos así proceden los de SPD de Chile) cuando está terminado se realiza el ensayo y los resultados son los mismos que se obtuvieron en el laboratorio.

Si se va a validar la compra mediante un ensayo, en que el Proyectista Estructural, estará presente, no hay razón de tener desconfianza en el producto.

Con este antecedente, en este estudio se diseñaron dos aisladores para el Hospital de Quinindé, el uno tiene una dimensión aproximada de 1.10m por 1.10 m. que es el de triple péndulo de fricción y el otro de 1.40 m por 1.40 m. que es el ortotrópico PFOT, fabricado en Chile.

Es verdad que el de Chile es un poco más grande pero estos van sobre pedestales que se encuentran en un subsuelo, de tal manera que no se van a ver.

Por último pero en primer lugar se debe manifestar que se ha diseñado los aisladores considerando que la superestructura se va a desplazar como cuerpo rígido durante un terremoto, de tal manera que el sistema tiene un grado de libertad que es el desplazamiento lateral. En el siguiente artículo se realiza el análisis sísmico considerando la geometría de la estructura, se lo hizo de esta manera por la extensión de la publicación.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., Rivas-Medina A., Iza E., (2018), "Determinación de espectros y sismos para el diseño de Hospital de Quinindé con aisladores sísmicos", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* en revisión arbitral, 28 pp.
2. Aguiar R., (2017), "Descripción de la construcción de los Bloques Estructurales con aisladores sísmicos de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Segunda Parte", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **22 (4),** 459-478.
3. Aguiar R., Morales E., Guaygua B., López E., Tipanluisa E., (2016, a), "Cálculo de la torsión en aisladores FPT en el análisis simplificado lineal y en el espectral. Aplicación al Bloque Tres del Centro de Investigaciones de la UFA-ESPE", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **21 (1),** 27-43
4. Aguiar R., Zevallos M., Palacios J., García L., Menéndez E., (2016, b), *Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía. Terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016,* Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, 283 p. Portoviejo, Ecuador.
5. Aguiar R., Morales E., (2016), "Desempeño del aislador FPT8833/12-12/8-6 empleado en la construcción del Centro de Investigaciones de UFA-ESPE mediante análisis no lineal", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **21 (1),** 79-104. Disponible en: http://www.riie.espe.edu.ec
6. Aguiar R., (2010), "Peligrosidad sísmica del Ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas, con aisladores de base FPS", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **15 (1),** 85-118.
7. Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V., (2008) *Aisladores sísmicos Elastoméricos y FPS,* Centro de Investigaciones Científicas CEINCI, Escuela Politécnica del Ejército ESPE, 270 pp.

8. Alcaíno P. (2017), *Ensayo prototipo aislador AFR4020-800/450-N1, Prototipo 2, Sistemas de Protección Dinámicos SpA.* Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 19 p, Chile.
9. ASCE 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,* American Society of Civil Engineers, 608 p.
10. Constantinou M., Aguiar R., Morales E., Caiza P., (2016), "Desempeño del aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del Centro de Investigaciones y de Post Grado de la UFA-ESPE", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **21 (1),** 1-25 Disponible en: http://www.riie.espe.edu.ec
11. Constantinou, M.C, Kalpakidisk, I., Filiatrault A., Ecker R.A., (2011), *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators,* MCEER Report **11-0004**, September 26, 2011.
12. Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M. and Warn, G.P., (2007), *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading,* Report No. **MCEER-07-0012**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 2007. Available at http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Performance-of-Seismic-Isolation-Hardware-Under-Service-and-Seismic-Loading-MCEER-07-0012.html
13. Delgado I., Aguiar R., Caiza P., (2017), "Bilinear Model Proposal for Seismic Analysis using triple friction pendulum (TFP) bearings", *Open Journal of Civil Engineering,* **7,** 14-31.
14. EPS (2015), "Ensayo de FPT8833/12-12/8-5 para Universidad de Fuerzas Armadas ESPE", Earthquake Protection Systems, EPS, Mare Island, Vallejo, California.
15. EPS (2016), *Bearing Engineering, Prototype and Production Quality Control Test Report For Sports Medicine Building, Peru,* Earthquake Protection Systems, EPS, 140 pp. Mare Island, Vallejo, California.
16. Fenz D., Constantinou M., (2007), Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings, Technical Report **MCEER-08-0007**, *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.* Available at http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html
17. Fenz, D.M. and Constantinou, M.C., (2008), *Development, implementation and verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical sliding bearings.* Report No. **MCEER-08-0018**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. Available at http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Development-Implementation-and-Verification-of-Dynamic-Analysis-Models-for-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0018.html
18. Idini B., Rojas F., Ruiz S., Pastén C., (2017), "Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone", *Bulletin Earthquake Engeneering,* **15,** 1853-1880.
19. McVitty, W.J. and Constantinou, M.C., (2015), *Property modification factors for seismic isolators: Design Guidance for Buildings,* Technical Report No. **MCEER-15-0005**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 2015.

Available at http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Property-Modification-Factors-for-Seismic-Isolators-Design-Guidance-for-Buildings-MCEER-15-0005.html

20. Montalva G., Bastías N., Rodríguez-Marek A., (2017), "Ground-Motion prediction equation for the Chilean Subduction Zona", *Bulletin of the Seismological Society of America,* **107 (2)**, 11 pp.
21. Morales E., (2017), *Reforzamiento sísmico de estructuras,* Presentación en XI Congreso de Ciencia y Tecnología. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.
22. NEC-SE-DS (2015) *Norma Ecuatoriana de la Construcción,* Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI.
23. NIST (2011), *Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses,* National Institute of Standards and Technology NIST. U.S. Department of Commerce.
24. Parra H., (2016), *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la Peligrosidad Sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito,* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
25. Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Ouchi T., Takahashi T., … and Fukushima Y., (2006), "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", *Bulletin of the Seismological Society of America,* **96 (3),** 898-913.

ANEXO 1

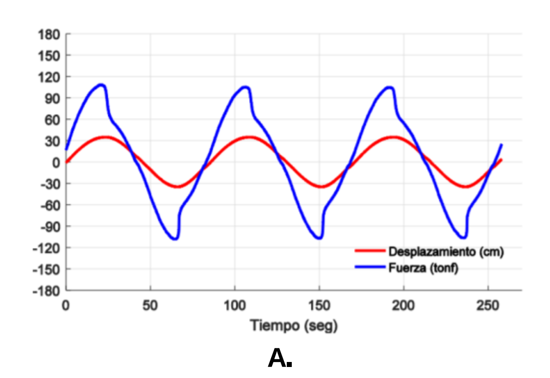
ENSAYO DE AISLADOR PFOT PARA EDIFICIO DE SAN JUAN EN ARGENTINA

En la figura A1, se observa uno de los aisladores, que emplearon en la construcción de un edificio en San Juan, Argentina, que dicho sea de paso, es una ciudad de alta peligrosidad sísmica. Este aislador fue ensayado ante diferentes cargas verticales y para diferentes desplazamientos esperados.



Figura A1 Aislador de Péndulo Friccional Ortotrópico PFOT para edificio de San Juan, Argentina. Fuente: SPD (2017)

En este apartado se presenta en la figura A2, el resultado para una carga vertical de 473 T., asociado a un desplazamiento lateral de 36 cm. Datos proporcionados por el Proyectista Estructural. El coeficiente de roce es 0.035.



A.

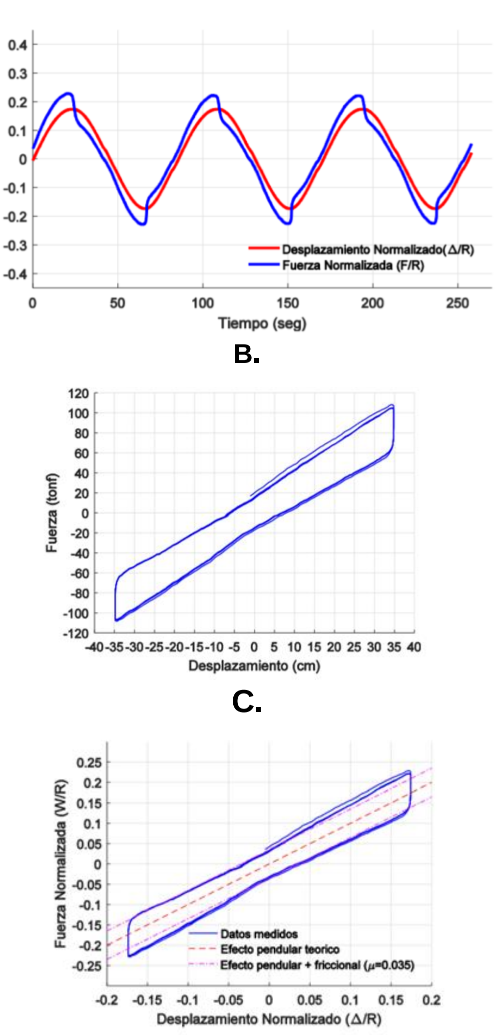


Figura A2 Resultados del ensayo de un aislador PFOT; A. Desplazamiento y fuerza lateral en función del tiempo; B. Desplazamiento y Fuerza Normalizada en función del tiempo; C. Constitutiva Fuerza Desplazamiento; D. Constitutiva Fuerza Desplazamiento Normalizados. Fuente: Alcaíno (2017)